



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

MODUL PRO ŘÍZENÍ DC MOTORŮ

MODULE FOR CONTROL DC MOTORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. BOHUMIL FOJT

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. TOMÁŠ MARADA, Ph.D.

BRNO 2010

ABSTRAKT

Předmětem této diplomové práce je polohové řízení stejnosměrného motoru s vlastní navrženou elektronikou.

Hlavním cílem diplomové práce bylo seznámit se s principem řízení stejnosměrných motorů. Dalším cílem bylo seznámení se s principem vyhodnocování signálů z rotačních inkrementálních snímačů a provedení návrhu elektroniky pro polohové řízení DC motorů.

ABSTRACT

Subjects this diploma thesis is positional DC motor control with personal designed electronics.

Main body the diploma thesis was meet principle DC motor control. Further purposes was apprise of principle signal analyse from rotary incremental sensor and implementation design electronics for positional DC motor control.

KLÍČOVÁ SLOVA

PWM, dsPIC30f2010, DRV8402, motor, řízení, IRC

KEYWORDS

PWM, dsPIC30F2010, DRV8402, motor, control, IRC

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FOJT, B. Modul pro řízení DC motorů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 57 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Marada, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „realizace řízení kráčivého autonomního robotu“ vypracoval samostatně bez cizí pomoci, na základě rad a pokynů vedoucího bakalářské práce. Vycházel jsem přitom ze svých znalostí, odborných konzultací a literárních zdrojů.

.....

Bohumil Fojt

Poděkování

Poděkování za výpomoc s realizací bakalářské práce musí patřit především mému vedoucímu bakalářské práce panu Ing Tomáši Maradovi, Ph.D., který mi byl nápomocen, při každém vzniklém problému a byl ochoten strávit čas při jejich řešení. Dále bych chtěl také poděkovat všem, kteří mi byly oporou při řešení problémů této práce.

Obsah

1.	ÚVOD	13
2.	ROTAČNÍ INKREMENTÁLNÍ SNÍMAČ POLOHY (IRC)	14
2.1.	PRINCIP ČINNOSTI IRC SNÍMAČŮ	14
2.2.	DEKÓDOVÁNÍ IRC SNÍMAČE	15
2.2.1.	<i>Jednoduchá přesnost</i>	16
2.2.2.	<i>Čtyřnásobná přesnost</i>	16
3.	STEJNOSMĚRNÝ MOTOR	18
3.1.	PRINCIP STEJNOSMĚRNÉHO MOTORU	18
3.2.	MOTOR S CIZÍM BUZENÍM	21
3.3.	ŘÍZENÍ STEJNOSMĚRNÉHO MOTORU	22
3.3.1.	<i>Tranzistorový čtyřkvadrantový pulzní měnič</i>	23
3.4.	DC MOTOR A-MAX 22	25
4.	ŘÍDÍCÍ ČÁST S MIKROPROCESOREM	27
4.1.	MIKROPROCESOR DSPIC30F2010	27
4.2.	NÁVRH SCHÉMA ZAPOJENÍ	28
4.3.	DESKA PLOŠNÉHO SPOJE	30
4.4.	ZAPOJENÍ PROPOJOVACÍHO KONEKTORU	31
4.5.	KOMUNIKAČNÍ PROTOKOL	32
5.	VÝKONOVÁ ČÁST	34
5.1.	DRV8402	34
5.2.	ACS712	36
5.3.	OBVOD NAPÁJENÍ	37
5.4.	PODPŮRNÉ OBVODY	37
6.	ŘÍDÍCÍ PROGRAM	39
6.1.	VÝVOJOVÝ DIAGRAM ŘÍZENÍ	39
6.2.	SNÍMÁNÍ ŘÍDÍCÍCH VELIČIN	41
6.2.1.	<i>Snímání polohy a rychlosti</i>	41
6.2.2.	<i>Snímání proudu</i>	41
6.3.	NASTAVENÍ INICIALIZACÍ	42
6.4.	REGULACE	43
6.4.1.	<i>PID regulátor</i>	44
6.4.2.	<i>PSD regulátor</i>	45
6.4.3.	<i>Nastavení regulátorů metodou Ziegler-Nichols</i>	46

6.5. PROGRAMOVACÍ ROZHRANÍ.....	47
7. ZÁVĚR	48
POUŽITÁ LITERATURA	49
SEZNAM OBRÁZKŮ	52
SEZNAM TABULEK	54
SEZNAM PŘÍLOH.....	55
PŘÍLOHA č. 1 – ROZMÍSTĚNÍ KONEKTORU ŘÍDÍCÍ DESKY	56
PŘÍLOHA č. 2 – ROZMÍSTĚNÍ KONEKTORU VÝKONOVÉ DESKY	57

1. ÚVOD

Při návrhu řízení je důležité rozmyslet si, co od řízení požadujeme. Zda chceme pouze nastavovat polohu, kdy nás nezajímá za jakých podmínek a jak rychle se na požadovanou polohu dostaneme, nebo od řízení očekáváme plnou kontrolu nad celým dějem. V takovém případě je třeba rozhodnout, jaké veličiny potřebujeme pro naše řízení. Pro ochranu výkonového obvodu a také motoru, je vhodné použít měření proudu s regulací nebo měření napájecího napětí a ověřit si, zda nedochází k jeho kolísání, při napájení např. z baterie.

Jedním cílem této práce je seznámit se s řízením stejnosměrného motoru. Měli bychom se dozvědět o regulaci motoru a její funkci.

Dalším cílem je seznámení se s inkrementálními snímači, které jsou nejpoužívanějšími a prakticky všude kolem nás. Denně s nimi pracujeme, často aniž bychom o tom věděli.

Dále následuje návrh elektroniky řízení. Nejprve je nutné si promyslet, jaký výkon budeme ovládat a jakou velikost napájecího napětí potřebujeme. Naším požadavkem je sestavit elektroniku pro univerzální použití, s jakou by sedalo pracovat v laboratoři při cvičení programování PLC automatů. Také budeme usilovat o to, aby se s ní mohl ovládat 2D laserový dálkoměr SICK pro skenování prostoru a nahrazení tak 3D dálkoměru.

2. ROTAČNÍ INKREMENTÁLNÍ SNÍMAČ POLOHY (IRC)

Pro řízení rychlosti nebo polohy motoru potřebujeme znát jeho přesnou polohu nebo rychlost a zároveň ji musíme převést na elektrický signál, s kterým můžeme dále pracovat. Tento převod mechanického pohybu na elektrický signál provádíme pomocí rotačních snímačů polohy. Takový převod umožňuje mnoho typů snímačů založených na různých principech. V zadání této práce máme optické inkrementální rotační snímače polohy, viz obr. 2.1. Jejich výhodou je vysoká rozlišovací schopnost a relativně nízká cena.



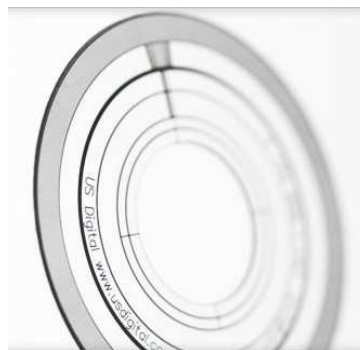
obr. 2.1 Rotační inkrementální snímač [16]

2.1. Princip činnosti IRC snímačů

Jak bylo uvedeno, rotační inkrementální snímač převádí natočení hřídele na elektrický signál. Základem tohoto převodu je průhledný kotouč se souměrně rozloženým počtem neprůhledných a průhledných dílků po celém jeho obvodu, připevněný na hnanou hřídel. Tyto dílky prochází optickými závory. Otáčením kotouče dochází ke střídání průhledných a tmavých značek. U optických závor dochází k přerušení paprsku a tedy posuvu rotoru o jeden krok K . Krok K tedy odpovídá jednomu přerušení paprsku a tímto dochází k vygenerování elektrického impulzu.

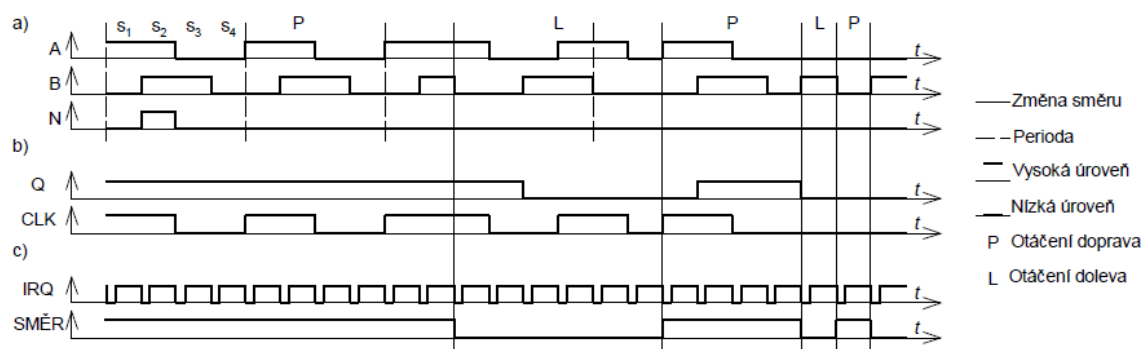


obr. 2.2 Optický snímač [16]



obr. 2.3 Stínítko [16]

Optická závora je složena ze zdroje světla (LED dioda), ze snímače světla (fototranzistoru) a ze stínítka. Stínítko je vloženo před fototranzistor pro lepší zastínění světla při průchodu černého dílku, aby nedocházelo k rušivým vlivům. Počet optických závor je dán počtem kanálů, který snímač obsahuje. Většinou se používají dva kanály A a B, ale u některých typů snímačů se využívá třetí kanál, jenž má na stínítku vlastní značku, jež je jediná za celou otáčku. Používá se z důvodu orientace, v jaké poloze se právě nachází od referenční polohy. Snímače kanálu A a B jsou navzájem od sebe posunuty o $n \cdot K + K/4$, čímž je docíleno zakódování směru otáčení hřídele, viz obr. 2.4a. [1]

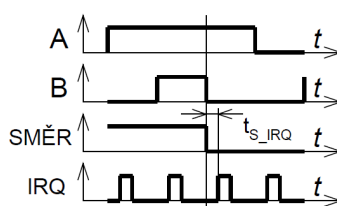


obr. 2.4 a) průběhy IRC snímače, b) zpracování klopným obvodem D pro jednoduchou přesnost, c) zpracování s čtyřnásobnou přesností [1]

2.2. Dekódování IRC snímače

Teoreticky se rozlišují tři možnosti dekodování, a to jednonásobná přesnost, dvounásobná přesnost a čtyřnásobná přesnost.

Prakticky se využívá buď pro jednoduchost zpracování jednonásobná přesnost, nebo pro možnost čtyřnásobného zpřesnění odečítání polohy čtyřnásobná přesnost. U obou způsobů zpracování je třeba zajistit, aby se při změně signálů A a B nejprve vyhodnotil a případně změnil směr, a teprve následně se vygenerovala aktivní hrana na signálu signalizujícím nastalou změnu signálů A a B. Pokud bychom toto nerespektovali, nastala by při změně směru chyba polohy o jeden impuls, a ta by se kompenzovala při změně na původní směr, viz obr. 2.55.



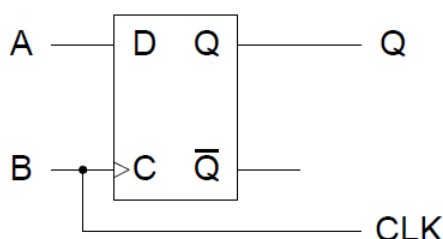
obr. 2.5 Uspořádání a časová následnost signálů z dekodéru [1]

Je nutné dbát na to, aby aktivní hrana čítaného signálu nebyla vygenerována současně s hranou změny směru a aby byla zpožděná o čas t_{S_IRQ} , jenž je daný typem použitého čítače.

V neposlední řadě je také potřebné mít na zřeteli, že signál z IRC čidla je ve většině případů asynchronní, v souvislosti s návaznými obvody, a měl by být před či při zpracování vzorkován, aby nedošlo k neurčitým stavům. [1]

2.2.1. Jednoduchá přesnost

K dekódování směru se používá jednoduchá logika, například klopný obvod D zapojený podle obr. 2.66. Jako hodinový signál pro čítač polohy lze využít jeden ze signálů A nebo B.



obr. 2.6 Obvod pro převod signálů A a B na signály směr (Q) a Clk pro jednonásobnou přesnost [1]

Znázornění výstupních signálů tohoto obvodu je na obr. 2.4 b. Z obrázku je zřejmá změna směru, detekovaná během poloviny periody signálů A (B). Dále je patrná neaktivní oblast vyhodnocení směru a polohy čidla. [1]

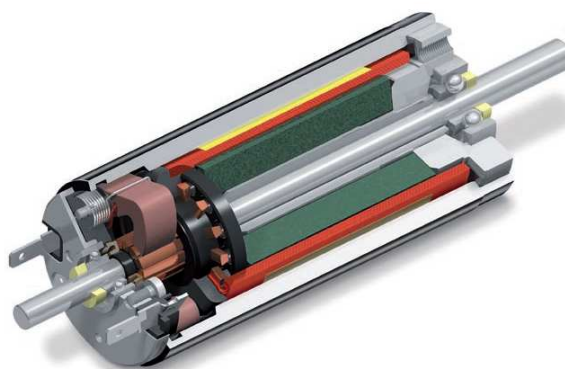
2.2.2. Čtyřnásobná přesnost

Při čtyřnásobné frekvenci je nutná již složitější logika k dekódování směru a odvození hodinového signálu. Tato logika má za úkol vyrobit hodinový signál, rychlejší než signály A, B. Hodinový signál se rovná součtu derivací signálů A a B. Každá změna na signálech A a B odpovídá impulsu signálu IRQ. Signál směru má reagovat také rychleji než v jednonásobném vyhodnocení a musí se měnit na opačnou hranu, než je aktivní hrana hodinového signálu.

Průběhy po zpracování touto logikou jsou na obr. 2.4 c. Typ takového dekodéru lze vyřešit dalšími principy, například základní logikou hradel, pomocí programovatelných obvodů (GAL) nebo mikroprocesorem. [1]

3. STEJNOSMĚRNÝ MOTOR

Stejnoscsměrný motor je nejstarším používaným motorem. První elektrické sítě byly napájeny stejnosměrným napětím, které bylo vyrobeno pomocí stejnosměrného dynama poháněného parním strojem. Jednou z možností stejnosměrného motoru je výroba elektrického napětí, avšak většinou je nahrazován převážně asynchronními motory s nižší výrobní cenou. Stejnoscsměrný motor se skládá z rotoru a statoru, viz obr. 3.1.



obr. 3.1 Stejnoscsměrný motor [13]

Stator motoru je pevná nepohyblivá část motoru tvořená z permanentních magnetů ze vzácných kovů nebo z vinutí vytvářejícího magnetické pole.

Rotor motoru je pohyblivá část motoru složená z hřídele, na niž je připevněna kostra složená z izolovaných křemíkových plechů a komutátoru. Do plechů jsou vloženy jednotlivé cívky vynutí a připojeny k lamelám komutátoru. [2]

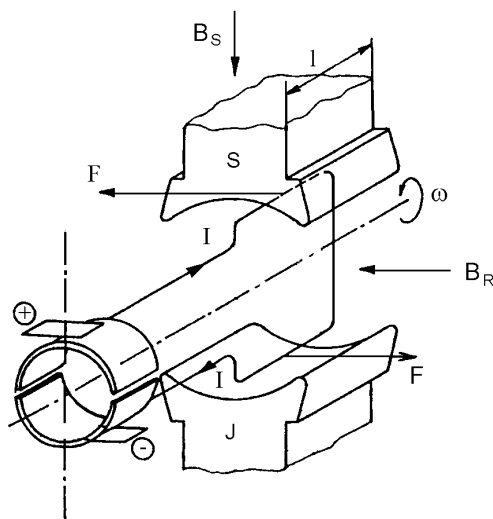
3.1. Princip stejnosměrného motoru

Princip činnosti stejnosměrného motoru lze vysvětlit pomocí elementárního stroje s jedním závitem na rotoru, viz obr. 3.2. Závit je umístěn do magnetického pole, který se otáčí mezi dvojicí hlavních pólů (s jedním jižním a severním pólem s roztečí τ). Začátek a konec závitu je pevně připojen k dvěma lamelám komutátoru. Na lamely jsou přitlačeny kartáče nebo plíšky umístěné v neutrální ose hlavních pólů a připojené ke stejnosměrnému napětí s polaritou podle obr. 3.22. V uzavřeném obvodu jednoho závitu prochází elektrický proud a pokud se nachází v magnetickém poli, působí na vodič síla. Výpočet je uveden v 2. rovnici, kde B je magnetická indukce, I je proud protékající vodičem a l je délka vodiče

v magnetickém poli. Směr síly určíme podle pravidla levé ruky, kde palec ukazuje směr proudu a prsty směr síly.

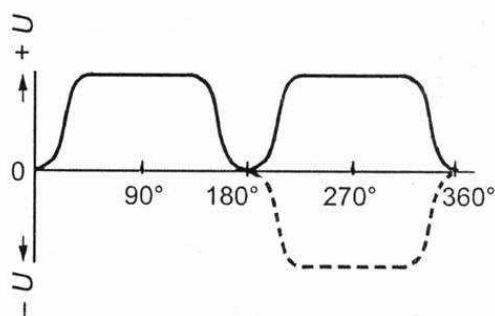
$$F = B \cdot I \cdot l$$

rov. 1



obr. 3.2 Elementární stroj [8]

Síla působící na vodič vytváří mechanický točivý moment a kotva se roztočí ve směru jejího působení. Na obr. 3.3 je znázorněn průběh napětí na komutátoru a napětí značené čárkovaně je napětí procházející vinutím rotoru. Napětí na rotoru je již střídavé, což je pro plynulé otáčení motoru nutností. Kdyby se směr proudu neměnil, závit rotoru by se zastavil v kolmé poloze vůči neutrální ose. Vzhledem k přítomnosti průchodu střídavého napětí na rotoru (kotvě) musí být rotor složen z plechů. Hlavní póly statoru mohou být z lité oceli (pokud nejsou z permanentních magnetů), ale z provozních a technologických důvodů se často skládají z plechů. Díky tomu, že magnetické pole není rovnoměrné po celém obvodu statoru a průběh napětí v rotoru je pulzující, je nutné zvýšit počet lamel a cívek pro hladší běh motoru.



obr. 3.3 Průběh napětí na komutátoru [8]

Pro stejnosměrný motor platí dvě základní rovnice, a to momentové a napěťové. Otáčí-li se rotor rychlostí otáčení ω a prochází magnetickým tokem Φ , na vinutí kotvy se indukuje napětí U_i . Prochází-li vinutím proud I vzniká na rotoru moment, viz rovnice 2 a 3. C je konstanta motoru.

$$U_i = C\Phi\omega \quad \text{rov. 2}$$

$$M = C\Phi I \quad \text{rov. 3}$$

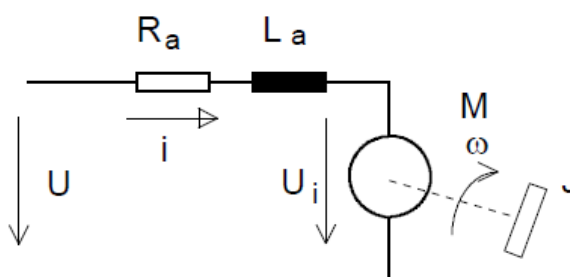
Stejnoseměrný motor lze vyjádřit náhradním schématem, viz obr. 3.4. Schéma je složené ze sériového zapojení cívky, rezistoru a zdroje napětí napájeného stejnosměrným napětím U . Podle 2. Kirchhoffova zákona je součet všech napětí v uzavřené smyčce v jakýkoli okamžik roven nule. Provedeme-li součet napětí v náhradním schématu, dostaneme rovnici 3, při dosazení za U_i rovnici 2.

$$U = R_a i + L_a \frac{di}{dt} + C\Phi\omega \quad \text{rov. 4}$$

Ze zákona zachování momentu hybnosti lze odvodit druhou momentovou rovnici podle obr. 3.4. Moment rotoru, viz rov. 3, je zdrojem pro zatěžovací moment M_o , ke kterému musíme připočítat moment z viskózního tření $B\omega$ a moment setrvačnosti J .

$$C\Phi i = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + M_o \quad \text{rov. 5}$$

Výsledné diferenciální rovnice jsou rovnicemi přechodného stavu stejnosměrného motoru. [2][9][10]



obr. 3.4 Náhradní schéma stejnosměrného motoru [2]

3.2. Motor s cizím buzením

Stejnoseměrné motory se dělí do čtyřech skupin podle buzení (na cizí, derivační, sériové a kompaundní více v [10]). Motory buzené cizím buzením se dále dělí na motory s permanentními magnety nebo s vinutým statorem.

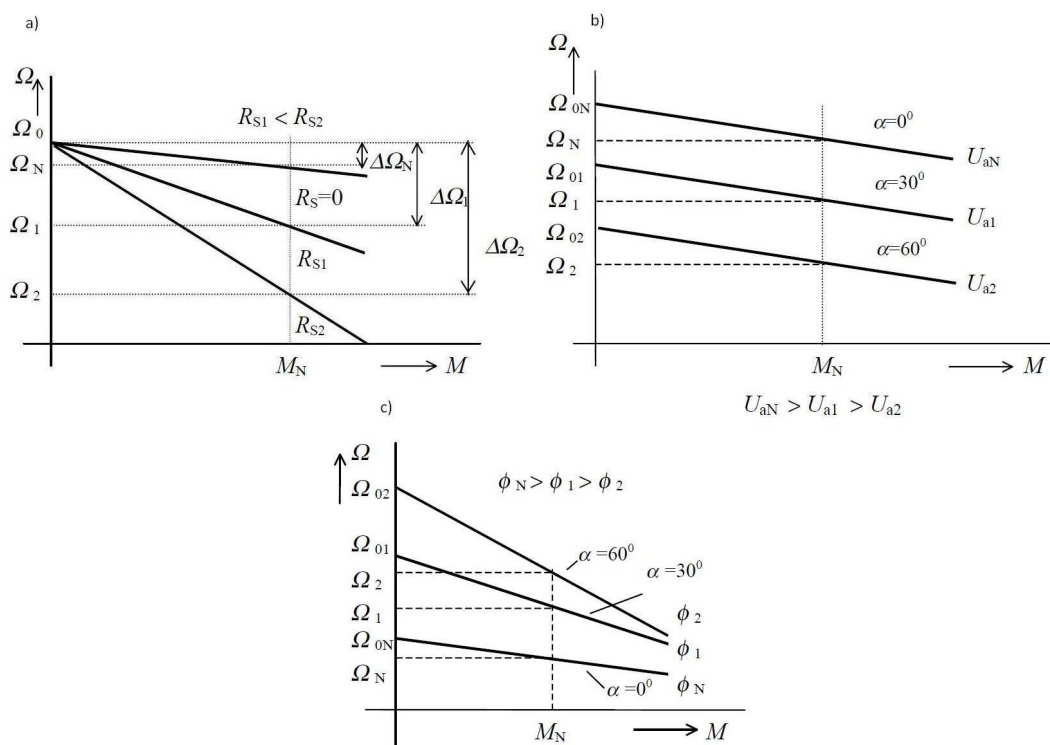
Cize buzený motor napájíme jiným zdrojem napětí než rotor. S tímto zapojením se setkáváme u méně případů, například u regulačního soustrojí motor – generátor. Pro nás jsou nejzajímavější motory s permanentními magnety, které mají napájený pouze rotor. Důležitou otázkou pro nás je jak tyto motory řídit.

Při úpravě rovnice 4, pro motor v ustáleném stavu, kde nám vypadne napětí z indukčnosti, lze odvodit vztah pro úhlovou rychlost, viz rov. 6.

$$\omega = \frac{U}{C\Phi} - \frac{R_a}{(C\Phi)^2} M \quad \text{rov. 6}$$

V rovnici 6 jsou vypsány všechny proměnné, které mohou ovlivnit velikost otáček. Takže regulace otáček stejnosměrného motoru můžeme řídit těmito způsoby [9]:

- **Změnou odporu R_a** v obvodu kotvy připojením přídavného odporu. Tento způsob řízení je málo používaný z důvodů velkých ztrát na tomto odporu zvláště při velkých výkonech. Ale je možné ho použít pro rozběh motoru, viz obr. 3.55a.
- **Změnou magnetického toku Φ** pokud by stator obsahoval budící vinutí. U motoru s permanentními magnety magnetický tok měnit nelze, jelikož je dán vlastností magnetu. Mechanické vlastnosti snižováním magnetického toku (odbuzováním) se charakteristiky změkčují, viz obr. 3.55c.
- **Změnou svorkového napětí U** je plynulá změna rychlosti otáčení motoru v celém rozsahu motoru. Je to řízení s malými ztrátami a umožňuje změnu směru otáčení, viz obr. 3.55b. [2]

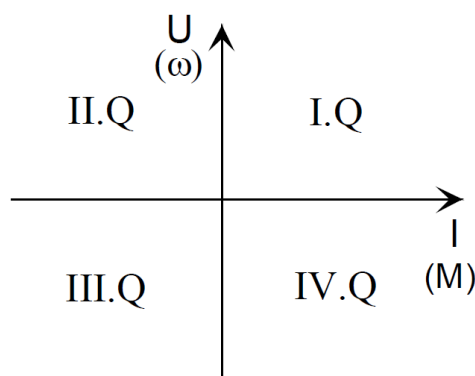


obr. 3.5 Charakteristiky závislosti otáček na momentu a) změna odporu, b) změna napětí, c) změna magnetického toku [9]

3.3. Řízení stejnosměrného motoru

Regulaci motoru tedy provádíme změnou napájecího napětí. Další způsob regulace, jako je změna magnetického toku, je u motoru s permanentními magnety nemožný a změna odporu vinutí kotvy je příliš ztrátová. Motor tedy reaguje na změnu střední hodnoty napájecího napětí. Při zatížení motoru velkým momentem při polovičním napětí oproti jmenovitému, by se velikost proudu dvakrát zvýšila. Tak velké proudy jsou potom náročné na výkonnost řídicí elektroniky a řídicí elektronika se zvyšujícím výkonem zdražuje. Proto je mnohem výhodnější napájet motor jmenovitým napětím, rozdělit ho frekvencí a přitom měnit její střídu. Frekvence rozděleného napětí bývá nastavována v desítkách až stovkách kHz. Pro takového řízení se používají H-můstky ovládané PWM signálem (pulzní šířková modulace).

Řízení motoru se dělí do čtyř pracovních kvadrantů a ty jsou rozděleny dvěma vzájemně kolmými osami. Vodorovná osa představuje směr proudu procházející motorem (popř. momentu) a svislá směr napájecího napětí motoru (rychlosti otáčení). Rozdělení a popis kvadrantů je naznačen na obr. 3.6.

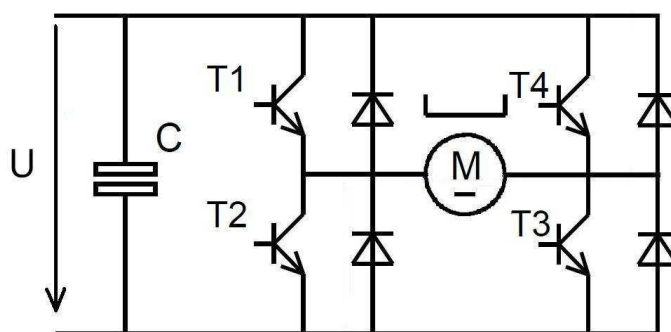


obr. 3.6 Rozdělení pracovní oblasti motoru [2]

Jednokvadrantový měnič (I.Q) dovoluje jen jeden směr výstupního proudu a jednu polaritu výstupního napětí, u pohonu pak motorický chod také jen v jednom směru otáčení. Dvoukvadrantový měnič s pracovní částí v prvním a čtvrtém kvadrantu (I.Q a IV.Q) dovoluje při jednom směru výstupního proudu měnit polaritu výstupního napětí, dvoukvadrantový měnič s pracovní částí v prvním a druhém kvadrantu (I.Q a II.Q) dovoluje měnit směr proudu při jediné polaritě výstupního napětí. Čtyřkvadrantový měnič pak dovoluje oba směry výstupního proudu při obou polaritách výstupního napětí, přičemž I. a III. kvadrant představují tok energie např. z elektrické sítě (zdroj) do stejnosměrného motoru (zátěž), II. a IV. kvadrant uvádějí rekuperaci energie ze zátěže zpět do sítě (např. při brzdění motoru). U pohonu uvádí I. kvadrant motorický chod na jednu stranu otáčení hřídele motoru, III. kvadrant zase motorický chod při opačném směru otáčení, II. kvadrant pak generátorický chod (brzdňý režim) při jednom směru otáčení a nakonec IV. kvadrant generátorický chod při opačném směru otáčení. Čtyřkvadrantový pohon tedy umožňuje oba směry otáčení i oba směry momentů v každém z obou směrů otáčení, tzn. jak akcelerace, tak i brzdění. Kvalitní řízení motoru v rychlostní a stejně tak polohové vazbě je realizovatelné pouze čtyřkvadrantovým pohonem. [2]

3.3.1. Tranzistorový čtyřkvadrantový pulzní měnič

Pro řízení stejnosměrného motoru se používá tranzistorový pulzní měnič, viz obr. 3.7, který pracuje se spínacím kmitočtem v řádu jednotek a desítek kHz. To má za následek dobré dynamické vlastnosti.



obr. 3.7 Tranzistorový pulzní měnič

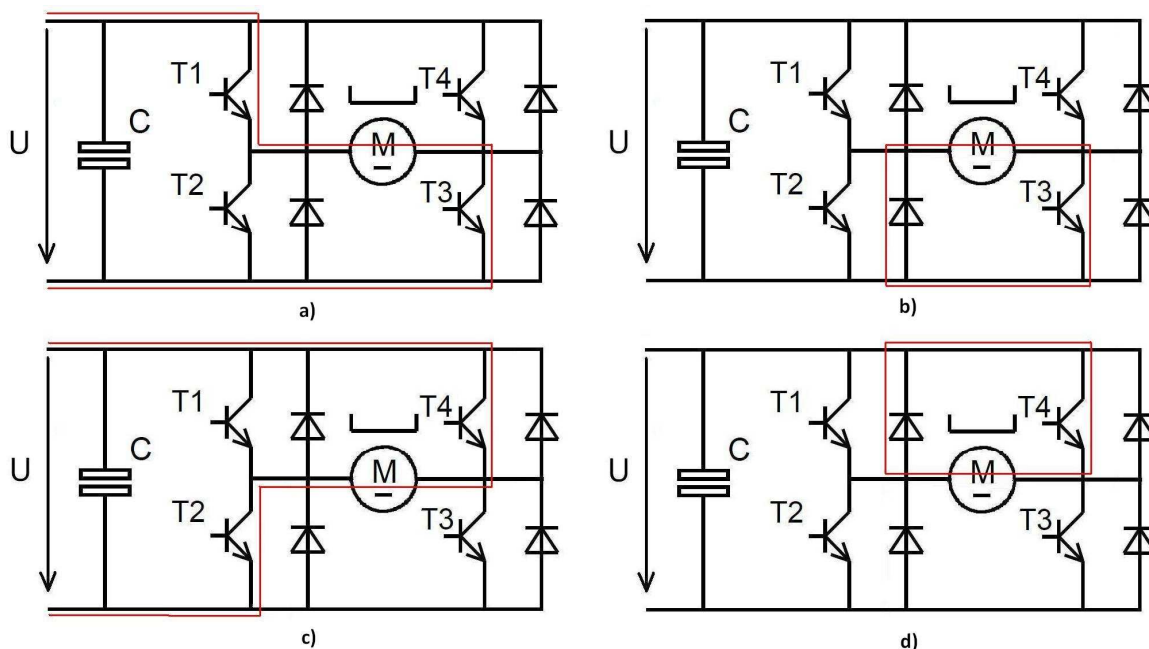
Hlavními prvky tranzistorových pulzních měničů jsou unipolární MOS-FET tranzistory, bipolární tranzistory s izolovanou bází IGBT (insulated gate bipolar transistor). Pro řízení unipolárních tranzistorů potřebujeme mnohem nižší výkony oproti bipolárním z důvodu toho, že unipolární tranzistory jsou řízeny napětím a bipolární tranzistory proudem. V tab. 1 je porovnání některých parametrů bipolárních a unipolárních tranzistorů. Pro shrnutí jsou bipolární tranzistory lepší pro řízení vyšších napětí, protože nemají žádný vnitřní odpor v sepnutém stavu, ale pouze úbytek napětí v podobě saturačního napětí U_{sat} , což je zanedbatelné. Použitím MOS-FET tranzistorů pro řízení obvodu s nízkým napětím je ztráta na odporu v sepnutém stavu nižší než je velikost saturačního napětí u IGBT tranzistorů.

	IGBT	MOS-FET
Vstupní odpor	$< 100 \, \Omega$	$> 10^9 \, \Omega$
Výkonové zesílení	100	10^{99}
Doba sepnutí t_{on}	100 ns	10 ns
Spínací frekvence	1 – 5 kHz	10 – 100 kHz
Saturační napětí U_{sat}	1 – 2,5 V	0
Odpor v sepnutém stavu	-	2 – 400 m Ω

tab. 1 Porovnání parametrů tranzistorů

Samotné řízení tranzistorového pulzního měniče probíhá následujícím způsobem. Průchod proudu a napětí je zakresleno červenou čarou v obrázku obr. 3.8. Takže obrázek obr. 3.8a představuje sepnutí tranzistoru T1 a tranzistoru T3. Motorem bude procházet kladné napětí s kladným proudem a to odpovídá I. kvadrantu – motorický režim. V případě že jeden z tranzistoru vypneme, např. T1, viz obr. 3.8b, obvod se uzavře přes nulovou diodu paralelní k T2, tím je zkratován a motor je v režimu generátorickém. To odpovídá IV. kvadrantu. Při sepnutí tranzistoru T2 a T4 podle obrázku obr. 3.8c je motor v motorickém stavu, ale

s opačnou polaritou napětí a tedy také s opačným směrem otáčení. Při vypnutí je pak obvod zkratován přes diodu, paralelně s T1, viz obr. 3.8d. [2]



obr. 3.8 Režimy pulzního měniče, vlevo pro motorický režim a), c) a vpravo pro generátorický režim b), d)

3.4. DC motor A-max 22

Pro nastavování polohy a ovládání měřicího scanneru jsme si vybrali stejnosměrný motor, který má dostatečný moment a možnost připojení inkrementálního snímače. Nejlepším řešením byl stejnosměrný motor s permanentními magnety od firmy Maxon, typ A-max 22. Jeho velikost a stavba je přímo přizpůsobená pro připojení ICR snímače a mimo jiné k němu lze připojit převodovku pro přesnější nastavování polohy. V následující tabulce jsou jeho parametry, tab. 2.

Jmenovitý výkon	6 W	Setrvačnost rotoru	4,26 gcm ²
Nominální napětí	12 V	Maximální otáčky	9800 ot/min
Otáčky na prázdko	10200 ot/min	Odpor vinutí	5,74Ω
Spouštěcí proud	2,09 A	Indukčnost	0,362 mH
Moment zvratu	22,8 mNm	Max. točivý moment stálý	6,77 mNm

tab. 2 Parametry motoru [13]

Hlavní výhodou motoru je malá hmotnost 54 g, délka 31,9 mm s průměrem 22 mm.

Dále jsme na motor přidali planetovou převodovku GP-22 C také od firmy Maxon, která má převodový poměr 231:1 a zaručí nám dostatečně přesnou polohovou regulaci s potřebným momentem. Převodovku lze trvale zatížit 1,8 Nm kroutící silou a její setrvačnost je 0,4 gcm². [13]



obr. 3.9 Planetová převodovka [13]

Nedílnou součástí motoru pro polohové řízení je inkrementální snímač. Jako nejlepší byl vybrán snímač HEDM-5500 J14. Je to dvoukanálový optický inkrementální snímač s 1024 dílky na otáčku. Snímač je napájen 5 V.

4. ŘÍDÍČÍ ČÁST S MIKROPROCESOREM

Pro řízení motoru použijeme mikroprocesor. K tomuto účelu potřebujeme mikroprocesor, který by obsahoval PWM generátor pulsů, dále vestavěný A/D převodník s co největším počtem bitů pro měření napětí, několik I/O pinů pro doplňující ovládání a jednotku pro komunikaci UART, což má drtivá většina mikroprocesoru a považuje se to za nezbytnou součást. Také by měl disponovat co nejvyšším frekvenčním taktem pro ovládání všech potřebných periférií v našem programu.

Pro snímání pulsů z IRC snímače jsme se snažili najít co nejlevnější a přitom vyhovující součástku. Na trhu je mnoho typů encoderů, ale jejich cena je příliš vysoká, např. HCTL-2016 nebo LS7083 a pod. Nejlevnějším způsobem bylo najít procesor přímo s integrovaným quadraturem encodérem. Jeden z těchto procesorů vyrábí firma Microchip s rodovým označením dsPIC. Mezi základní procesory této rodiny patří dsPIC30F2010 určený pro řízení motorů a ten jsme si vybrali pro tuto práci.

4.1. Mikroprocesor dsPIC30F2010

Základní informace o procesoru jsme si vyhledali v katalogovém listu tohoto procesoru. DsPIC30F2010 je 16-bitový upravený RISC procesor s Harvardskou architekturou pracující až s 30MIPs (milión instrukcí za sekundu). RISC architektura obsahuje redukovanou sadu instrukcí, což vede k zrychlení operační paměti. Harvardská architektura má ve srovnání s Von Neumannovou architekturou rozdělenou paměť na programy a paměť na data. Každá paměť vlastní svoji sběrnici a umožňuje přístup do pamětí zároveň. Sada instrukcí mikroprocesoru je optimalizována na C kompilér, díky němuž nemusíme zdrojový kód psát v assembleru. Velikost paměťového prostoru je v tab. 3.

Flash program	12 Kbytes
RAM	512 bytes
EEPROM	1 Kbyte

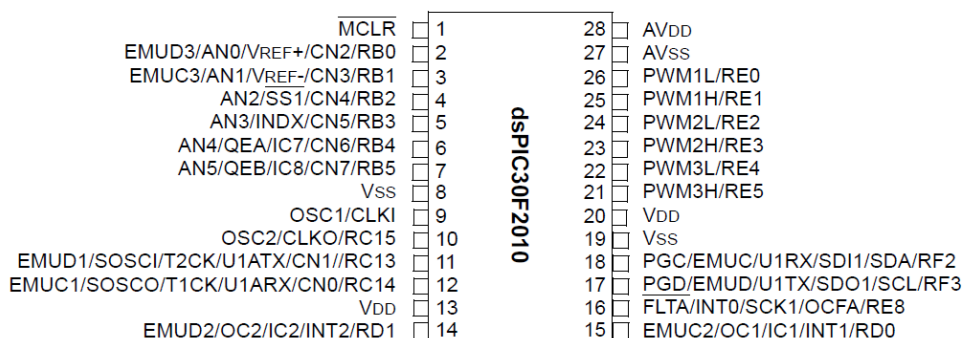
tab. 3 Velikost pamětí [4]

Procesor dále obsahuje 27 zdrojů přerušení, z čehož máme tři externí a u osmi přerušení lze uživatelsky nastavit prioritu přerušení.

Hlavní periférie tohoto mikroprocesoru jsou:

- Vysoké proudové zatížení vstupu/výstupu až na 25 mA
- 6 výstupních PWM kanálů
- 16-bitový encodér
- 10-bitový AD-převodník s šesti vstupy
- 3x 16-bitové čítače/časovače, volitelný pár čítačů/časovačů lze použít jako 32-bitový
- 4x 16-bitový záchytná vstupní funkce
- 2x 16-bitová srovnávací/PWM výstupní funkce s možností dvojitém srovnávacím režimem
- 3-vodičová SPI jednotka
- I2C jednotka s podporou multi-master/slave režim a 7-10-bitovou adresací.
- adresovatelnou UART jednotku s FIFO vyrovnávací pamětí

Mikroprocesor je vyráběn ve třech typech pouzder a z důvodu velikosti ale také z důvodu montáže jsme si vybrali SMD pouzdro velikosti SOIC s 28 piny, viz obr. 4.1.[4]

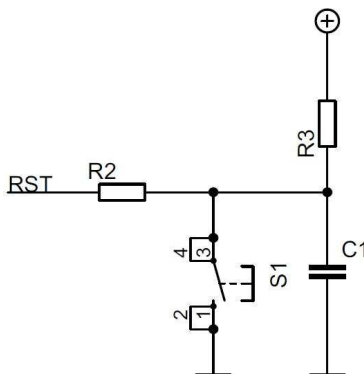


obr. 4.1 Pouzdro a rozmístění vývodů [4]

4.2. Návrh schématu zapojení

Při návrhu schéma zapojení jsme vycházeli z požadavku v zadání. Hlavní součástí je mikroprocesor dsPIC30F2010, jenž pro svoji činnost potřebuje mimo napájecí napětí také zdroj přesných hodinových impulsů. Abychom dosáhli rychlosti 30 MIPS, museli jsme si vypočítat rychlost požadovaného krystalu. Každá instrukce trvá čtyři takty hodinového impulsu a při použití násobičky impulsů 16x PLL dostáváme krystal o velikosti 7,3728MHz. Podle katalogového listu procesoru je potřeba připojit k vstupu krystalu ještě dva kondenzátory.

V případě, že bychom potřebovali resetovat řídicí obvod a tak spustit běh programu od začátku, přidáme do obvodu reset tlačítko, abychom si ho mohli sami vyvolat, viz. obr. 4.2.

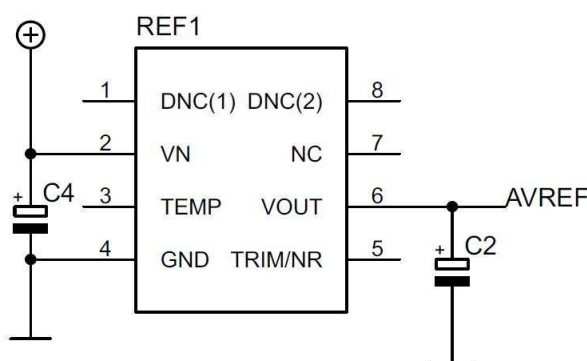


obr. 4.2 Obvod RESET s tlačítkem [3]

Nedílnou součástí schématu je možnost změny programu za jiný. Z toho důvodu jsme vyvedli piny ICSP (In-Circuit Serial Programming) jednotky pro sériové programování. Potřebné vývody jsme vhodně připojili ke konektoru ML10 a jeho zapojení a typ byl zvolen z důvodu stejného využití v laboratořích, kde bude dále používán. [3][4]

Pro nastavování polohy motoru a pro získání potřebných stavů řízení jsme si vyčlenili sériovou komunikaci RS232 s osobním PC. Mikroprocesor obsahuje sériovou komunikaci, ale v běžné TTL logice úrovní. Proto musíme do našeho schématu přidat převodník úrovně RS232 od firmy MAXIM typ MAX232CWE, k němuž je podle katalogového listu nutné připojit několik elektrolytických kondenzátorů. Jako výstupní konektor pro připojení k propojovacímu kabelu s počítačem jsme použili standardní konektor CANON9. [14]

Pro přesné měření napětí pomocí A/D převodníku jsme zvolili napěťovou referenci. Je to 5 V reference od Texas Instrument REF5050 v pouzdře SO-8. Přesnost reference udává katalog při běžných podmínkách s přesností na 0,1 % maximálně a to při nízkém šumu $3\mu\text{V/V}$. Důležité je nezapomenout, že reference potřebuje být napájena minimálně o 200 mV vyšším napětím než je její hodnota. Rozmístění vývodů a doporučené zapojení je na obr. 4.3. [15]



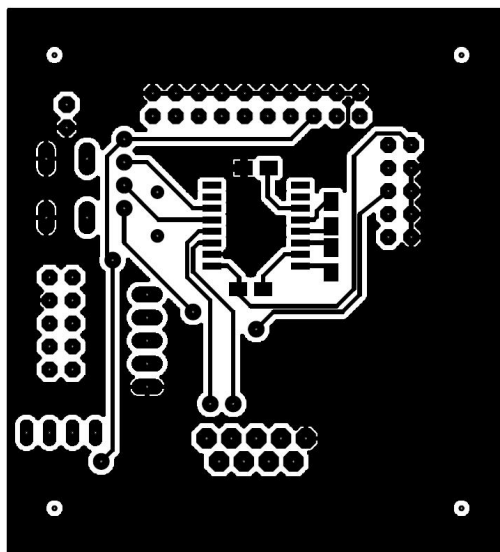
obr. 4.3 Zapojení reference REF5050 [15]

Konektor pro připojení IRC snímače jsme si zvolili ML10 a PSH02-05PG. Tento konektor je nainstalovaný na mnoha snímačích v laboratoři. Napájení a ovládací vstupní a výstupní piny jsou připojeny ke konektoru ML20 kterým se připojujeme k výkonové elektronice. Jeho zapojení a popis vývodů popíšeme v samostatné kapitole. Pro indikaci přivedeného napájecího napětí jsme do obvodu přidali červeně svítící LED diodu. [3][14]

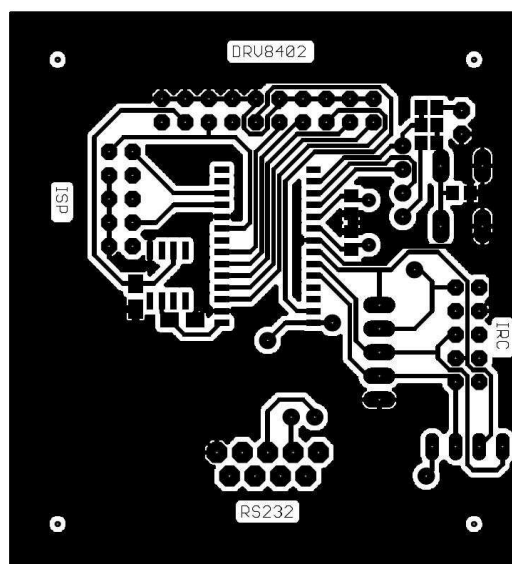
4.3. Deska plošného spoje

Pro návrh desky plošného spoje jsme využili programu Eagle. Je to program, jenž lze bez poplatku stáhnout na internetu a jeho použití pro nekomerční účely je taktéž zdarma. Program Eagle obsahuje již v základu knihovny s mnoha součástkami různých výrobců. Pokud součástka v knihovně není obsažena, není problém si ji v programu nakreslit a vytvořit si svojí knihovnu.

Samotnou desku jsme se snažili navrhnout s co nejmenšími ovšem praktickými rozměry. Jelikož většinu součástek použijeme v SMD provedení, tak nám nejvíce místa zabíraly konektory. Převážně ty nám určovali výsledný tvar destičky. Pro jednodušší propojování s co nejkratšími cestami jsme si destičku navrhly s oboustrannou vrstvou. Výsledná podoba destičky pro předlohu na výrobu samotné desky je na obrázku obr. 4.4 a obr. 4.5



obr. 4.4 Horní strana desky



obr. 4.5 Spodní strana desky

4.4. Zapojení propojovacího konektoru

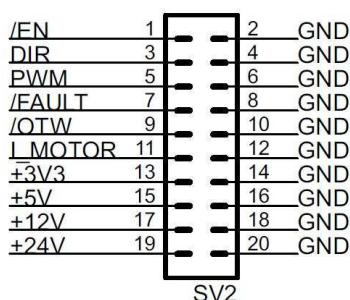
Pro připojení k výkonové elektronice je deska vybavena 20 pinovým konektorem ML20, kde se nachází vstupy s napájecím napětím. Zde je přivedeno 5 V pro napájení logiky a 12 V pro napájení napěťové reference. Mimo jiné je na konektor připojeno pět vstupně/výstupních pinů. První pin /EN je výstupní a ovládá zapínání a vypínání samotné

výkonové elektroniky. Druhý s třetím výstupem obsahují data o řízení motoru. Vývod DIR nastavuje směr otáčení a PWM obsahuje řídicí PWM signál.

Pin /FAULT a /OTW jsou vstupy informující o chybách výkonové elektroniky, např. zda není obvod přehřátý nebo zda na vstupu není příliš vysoký proud.

I_MOTOR je analogový vstup do A/D převodníku s informací o velikosti proudu procházející motorem.

Zbývající čtyři piny konektoru jsou napájeny z různých napěťových hladin a všechny zbývající sudé piny jsou uzemněny.



obr. 4.6 Zapojení konektoru pro spojení výkonové a řídicí desky

4.5. Komunikační protokol

Komunikace mezi počítačem a mikroprocesorem probíhá po sériové komunikaci RS232. Abychom docílili bezchybného a efektivního řízení, je zapotřebí si vytvořit komunikační protokol. Pro komunikaci z počítače jsme si stanovili, že počítač bude vysílat žádanou polohu hřídele do mikroprocesoru a mikroprocesor bude vysílat aktuální polohu a popřípadě chybu, která může nastat při nastavování.

Veškerá data, odesílaná v rámci celé zprávy, převedeme do ASCII znaků. Začátek zprávy je nastaven znakem STX s hodnotou 0x02 h. Dále bude pokračovat znak rozlišující obsah zprávy, zda jde o polohu nebo o chybu v řízení plus její hodnota. Potom následuje znak ETX odpovídající hodnotě 0x03 h a informující o konci textu, za nímž následuje CRC kontrolní součet. CRC kontrolní součet je byt, který nonekvivalentním součtem sečte všechny byty ve zprávě a tím je posledním bytem zprávy.

02	50	33	30	30	03	CRC
----	----	----	----	----	----	-----

tab. 4 Příklad poslané zprávy

Pro rozlišení, zda jde o zprávu ohledně polohy nebo chyby, jsme si nastavili znaky „P“ a „E“, viz tab. 5 Zkratky komunikačního protokolu. Za nimi následuje číselná hodnota chyby nebo polohy.

Hex	Název	Popis
02	STX	Začátek textu
03	ETX	Konec textu
06	ACK	Potvrzení příjmu dat
15	NAK	Špatný příjem dat
xx	CRC	Kontrolní nonekvivalentní součet
50	„P“	poloha hřídele
45	„E“	chyba v řízení

tab. 5 Zkratky komunikačního protokolu

Po každé přijaté zprávě pošle zařízení potvrzení správného příjmu dat, které odpovídá hodnotě ACK, tedy 0x06 h. Pokud data vyhodnotí jako nesmyslná, např. neodpovídá formát nebo se neshoduje kontrolní součet CRC, odešle hodnotu NAK 0x15 h. Po třetím špatném přijmutí dat se komunikace zastaví a je potřeba zkontrolovat, zda zařízení funguje správně a následně ho resetovat.

5. VÝKONOVÁ ČÁST

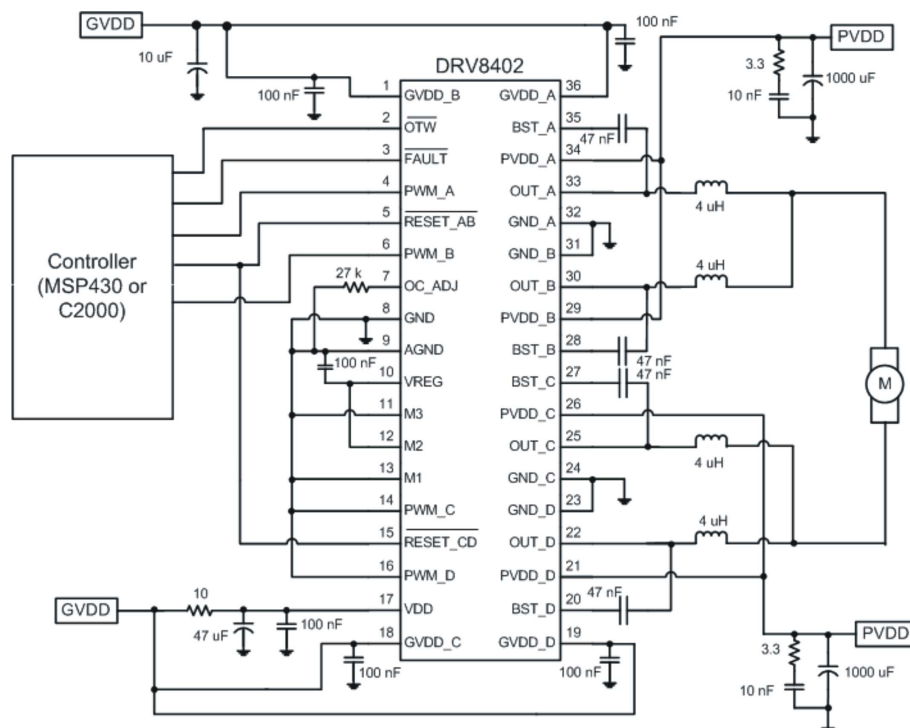
Ovládání motoru přes pulzní šířkovou modulaci musíme převést na napájecí napětí motoru. K tomuto účelu používáme H-můstky. Klasický čtyřkvadrantový tranzistorový H-můstek z důvodu velikosti použít nechceme, tak jsme se poohlédli po integrovaných H-můstcích s co nejvyšší proudovou zatížitelností. Jako výhodný integrovaný obvod jsme si vybrali DRV8402, který při vhodném zapojení dokáže ovládat motory až s 10 A stabilního proudu. Jelikož dále požadujeme, abychom mohli použít jakýkoli motor, třeba jen s maximálním proudem 0.5 A, tak musíme přidat do obvodu měření proudu pro případ, kdy na motoru vznikne veliký moment a proud překročí velikost maximálního proudu, aby se motor nespálil nebo poškodil.

5.1. DRV8402

DRV8402 je velice výkonný dvojitý plný H-můstek s integrovanými MOSFET tranzistory. Jejich vnitřní odpor $R_{DS(on)}$ má nízkou hodnotou 80 m Ω při teplotě 25 °C. Každý z můstků je složený ze dvou půlmůstků se vzájemně oddělenou zemí. Tím lze každou polovinu napájet jinou úrovní napájecího napětí. A to při napájecím napětí do 50V. Proudové zatížení každého můstku je 5 A nepřetržitých při špičkách maximálně do 12 A a při paralelním zapojení obou můstků lze řídit proudem 10 A při špičkovém zatížení do 24 A. Tento obvod umožňuje řízení klasických a bezkartáčových stejnosměrných motorů a řízení 3-fázových synchronních motorů s permanentními magnety. Pro řízení motorů jsou na obvodu vstupy PWM signálu, který může být v rozsahu od 25 KHz až po 500 KHz při vysoké účinnosti a dobré kontrole.

Také obsahuje integrovaný ochranný systém s širokou škálou poruchových stavů, které by mohli poškodit obvod. Mezi zabezpečení patří ochrana proti zkratu, nadproudová ochrana, jištění proti podpětí a dvoustupňová tepelná ochrana. Napájecí napětí určené pro napájení logiky je 12 V s nízkou impedancí a šumem. Řídící a informativní vstupy/výstupy jsou pro lepší kompatibilitu s dnešními procesory ovládány 3,3 V logikou. U výstupu FAULT a OTW je po připojení pull-up rezistoru 4,7 k Ω možno připojit na 5 V logiku.

Všechny potřebné kondenzátory a rezistory by měli být podle doporučení výrobce připojeny co nejbližší k vývodům obvodu.



obr. 5.1 Zapojení paralelního režimu [5]

Jelikož jsme si stanovili využití obvodu s co nejvyšším výkonem, tak jsme využili paralelního režimu, jenž umožňuje řízení motoru při 10 A stabilního proudu, viz obr. 5.1. Při použití tohoto režimu jsou dva výstupy půlmůstku (OUT_A a OUT_B, OUT_C a OUT_D) spojeny paralelně a ovládány jedním vstupem (PWM_A a PWM_B). Zbylé PWM vstupy máme napevno připojeny k zemi napájecího napětí.

Co se týče ochrany, jsou z obvodu vyvedeny dva piny OTW a FAULT, které určují typ nastalé chyby, viz tab. 6. Výstup OTW informuje o překročení teploty na čipu a FAULT informuje o překročení velikosti proudu nebo malého zdroje napětí. Tepelná ochrana čipu je nastavena při překročení 125 °C, to nastavuje ochranný výstup OTW. Při překročení teploty nad 150 °C je celý obvod zastaven a musí být vypnut a znovu zapnut.

FAULT	OTW	Popis
0	0	Nadměrná teplota s nadproudovou nebo podpět'ovou ochranou
0	1	Nadproudová nebo podpět'ová ochrana
1	0	Překročení teploty
1	1	Normální režim bez chyby

tab. 6 Možnosti vzniklých chyb [5]

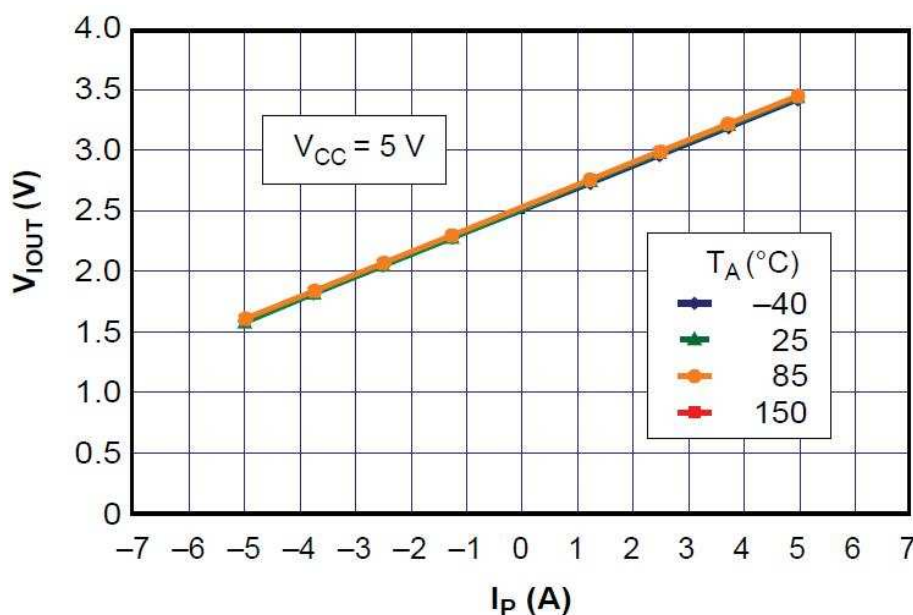
Vývod FAULT obsahuje chybová hlášení o překročení proudu nebo nedostatku napětí. Velikost maximálního proudu lze také nastavovat a to pomocí připojení daného odporu na vývod OC_ADJ a zvolit hodnotu odporu podle tab. 7. K tomuto obvodu musíme ještě připojit pasivní chladič, který ji bude dostatečně chladit i při vysokých výkonech. [5]

Velikost rezistoru [kΩ]	Maximální proud [A]
27	10,6
30	9,9
33	9,3
36	8,7
39	8,2

tab. 7 Volba rezistoru [5]

5.2. ACS712

ACS712 je integrovaný obvod měřící velikost stejnosměrného a střídavého proudu. Zařízení se skládá z přesného lineárního Hallova snímače s měděným vedením, umístěného blízko povrchu čipu. Proud teče skrz toto vedení a cesta tvoří magnetické pole, které je přes hallovu sondu převedeno do poměrného napětí s přesností 66 – 185mV/A. Přesnost měření je dána typem použitého obvodu. Tento integrovaný obvod se vyrábí ve třech typech, rozdělených podle velikosti měřeného proudu na ± 5 A, ± 20 A nebo ± 30 A. Pro náš obvod DRV8402 musíme použít 20 A verzi s měřicí přesností 100 mV/A. Výstupní signál informující o velikosti proudu je v rozmezí 0 až 5 V. Velikost výstupního napětí při nulovém proudu je roven 2,5 V a při kladné velikosti proudu je napětí přičteno a záporné je odečteno. Charakteristika výstupního signálu V_{IOUT} a měřeného proudu I_P představuje lineární křivku, a to i při širokém spektru působících teplot (T_A -teplota okolí), viz obr. 5.2. Minimální přesnost měření při teplotě 25 °C je pouhých 1,5 %. [7]



obr. 5.2 Voltampérová charakteristika ACS712 [7]

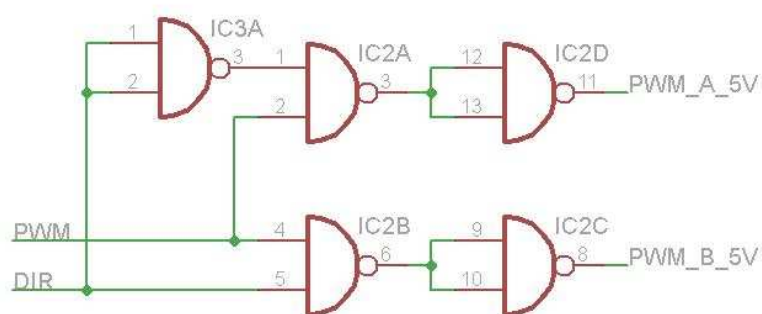
5.3. Obvod napájení

Obvod DRV8402 je napájen stejnosměrným napětím 12 V. Abychom nemuseli připojovat pouze zdroj tohoto napětí, přidali jsme do obvodu stabilizátor napětí 12 V. Poté lze obvod napájet napětím až do 35 V. Výkonový obvod dále obsahuje hradla, měření proudu a měnič úrovně napětí. Všechny uvedené součástky jsou napájeny 5 V a měnič úrovně napětí ještě potřebuje zdroj 3,3 V. Proto je za 12 V stabilizátor připojen stabilizátor na 5 a 3,3 V.

5.4. Podpůrné obvody

Jelikož procesor dsPIC30F2010 má ovládací logiku vstupu/výstupu 5 V, tak jsme nuceni mezi procesor a obvod DRV8402 přidat měnič úrovně napětí z 5 V na 3,3 V. Toto zajišťuje obvod TXB0104 a mimo jiné lze na 5 V vstup připojit napětí 3,3 V. Na výstupu obvodu tak bude dostatečná hladina, aby výkonový obvod rozlišil logické úrovně. [6]

Pro řízení plného můstku je zapotřebí dvou navzájem negovaných PWM signálů přicházejících z řídicího procesoru. Pro snížení zatížení a pro případ použití jiného procesoru, který disponuje pouze jedním PWM výstupem, jsme před výkonový integrovaný obvod vhodně zapojili hradla, podle obr. 5.33. Teď tedy máme na vstupu od procesoru jeden PWM signál a výstup přímo určující směr otáčení motoru.



obr. 5.3 Zapojení hradel pro řízení směru

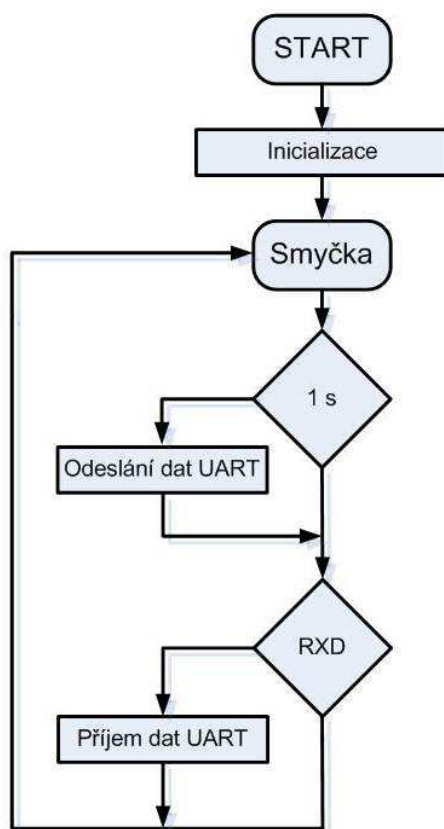
Pro snadné připojení řídicího obvodu jsme do obvodu přidali 20-pinový konektor ML20L, kde jsou vyvedeny všechny potřebné vstupy/výstupy a napájecí napětí. To je vyvedeno pro napájení řídicího procesoru, který může být 5 a 3,3 V logiky. Dále je ještě vyvedeno 12 V pro možnost řízení pomocí programovatelného automatu PLC. Na konektoru je vyveden výstup OTW a FAULT pro zpracování chyb a vstupy EN, PWM a DIR. Vstup DIR ovládá směr otáčení, EN zapíná a vypíná výkonový obvod a vstup PWM je vstup pro řídicí PWM signál.

6. ŘÍDÍCÍ PROGRAM

Hlavní kapitolou naší práce je tato. Zde jsou propojeny všechny výsledky naší práce do jednoho a vzniká jeden celek. Nejdůležitější částí je návrh vývojového diagramu, kde si rozvrhneme, jak program funguje.

6.1. Vývojový diagram řízení

Základní částí programu je hlavní smyčka, viz obr. 6.1. Po spuštění hlavní části je spuštěna inicializace všech proměnných a periférií používaných pro řízení, viz kapitola 6.3. Hlavní smyčka, je do nekonečna opakující se děj tvořící tělo programu. V něm probíhá komunikace s připojeným počítačem po sériové lince a v případě vzniklého přerušení se běh programu pozastaví a zpracuje jeho žádost.



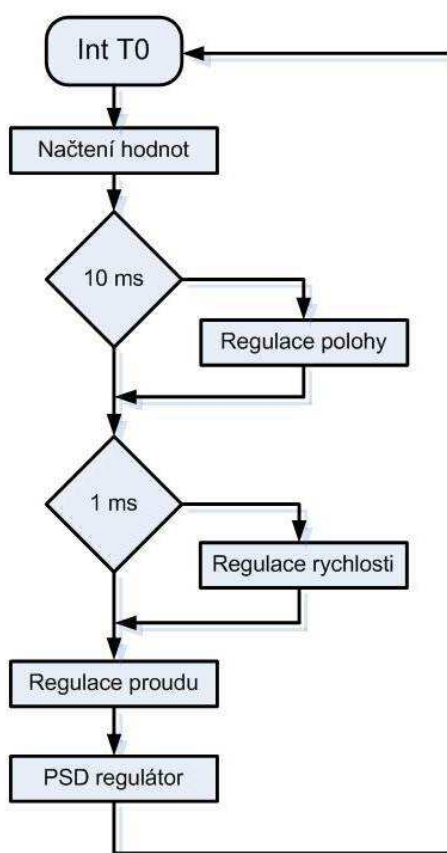
obr. 6.1 Vývojový diagram hlavní smyčky

Prvním krokem hlavní smyčky je odeslání dat, které se provádí v pravidelných cyklech jedné sekundy. Obsahuje také převod a formátování zprávy podle komunikačního protokolu.

Potom následuje příjem dat, volaný pouze při příchodu zprávy. To provádíme kontrolou přijímacího registru, v případě jeho naplnění je zpráva přijata. V bloku příjem dat zprávu následně převedeme a uložíme do patřičných proměnných, reagujících na požadavek.

Další nedílnou součástí je přerušení vyvolané časovačem Int T0, v němž probíhá výpočet regulace motoru. Přerušení časovače T0 je nastaveno na opakující se periodu 100 μ s. Tento čas odpovídá času periody regulační proudové smyčky, který jsme si takto nastavili.

V prvním bloku diagramu, viz obr. 6.2 Vývojový diagram časové smyčky, se nachází načtení hodnot z IRC snímače a výpočet hodnoty A/D převodníku. Následují operace spouštěné až po delším časovém intervalu. Na konci se nastavuje proudová regulace.



obr. 6.2 Vývojový diagram časové smyčky

Proudová regulace je nejnadřazenější řídicí strukturou, musí tudíž probíhat nejrychleji. Její hodnota je přepočtena PSD regulátorem a dále nastavena do PWM modulu. Takovýto děj se desetkrát opakuje, než přijde řada na rychlostní regulaci. Na její načasování není potřeba dalšího časovače, protože postačilo počítání počtu přerušení a v desátém cyklu regulaci rychlosti spustit. V rychlostní smyčce se vypočítá odchylka rychlosti hřídele a pomocí

akčního členu vstupuje do proudové regulace. Poslední regulací je požadovaná polohová, s opakovacím cyklem 10 ms. V polohové regulaci porovnáváme změřenou hodnotu s nastavenou, přes akční člen přivedeme k rychlostní regulaci.

6.2. Snímání řídicích veličin

6.2.1. Snímání polohy a rychlosti

Polohu získáváme z IRC snímače připojeného k motoru přes konektor IRC na řídicí desce s mikroprocesorem. Signály jsou připojeny na piny QEA a QEB procesoru, které jsou vstupy quadrurního encodéru. Encodér zaznamenává každou změnu polohy přičtením nebo odečtením hodnoty v registru POSCNT podle signálu z IRC snímače. Tím získáváme hodnotu polohy v dílcích. Tu dále převedeme na hodnotu velikosti úhlu. Samotný převod jsme provedli následujícím výpočtem v rov. 7.

$$\varphi = \frac{4096 \cdot 231}{pocet \cdot 4096 + POSCNT} \quad \text{rov. 7}$$

Součin hodnot 4096 a 231 odpovídá jedné otáčce motoru za převodovkou, tedy 360° . Hodnota 4096 je počet dílků v IRC snímači na jednu otáčku při quadrurním režimu encodéru a 231 je převodový poměr převodovky. Ve jmenovateli rovnice je proměnná *pocet*, do níž se ukládá počet otáček uskutečněných motorem a k níž se přičítá zbývající hodnota necelé otáčky. Výsledná přesnost nastavování polohy je $0,380 \cdot 10^{-3} [^\circ]$, viz rov. 8.

$$\varphi_{\min} = \frac{360^\circ}{4096 \cdot 231} = 0,380 \cdot 10^{-3} [^\circ] \quad \text{rov. 8}$$

Metoda výpočtu rychlosti rovněž využívá hodnot získaných při výpočtu polohy, avšak hodnotu čteme v přesném časovém intervalu. Každé čtení hodnoty provádíme jednou za 1 ms a poté hodnotu právě přečtenou odečteme od polohy získané v předchozím cyklu. Dělením změny polohy časovým intervalem získáváme rychlost počtu stupňů za 1 ms.

6.2.2. Snímání proudu

Pro snímání velikosti proudu využíváme periferie procesoru, jelikož vstupní veličina zastupující proud má napětí o velikosti 0 – 5 V. Použijeme vstup A/D převodníku AN0. Převodník je 10-bitový a výsledná hodnota je v rozmezí 0 – 1024. Při maximálním vstupním napětí 5 V na AN0 odpovídá výstup A/D převodníku v registru ADCBUF0 hodnotě 1024. Tomu odpovídá rovnice 7.

$$U_{AN0} = \frac{U_{REF}}{2^{10}} \cdot ADCBUF0 \quad \text{rov. 9}$$

Výstupní napětí z převodníku proudu určuje také směr proudu. Kladný směr proudu je vyšší než 2,5 V a proud se záporným směrem je v rozmezí 0 - 2,5 V. Pokud tedy obvodem neprochází proud, je hodnota napětí 2,5 V. Tuto hodnotu dále musíme převést na velikost proudu. ACS712 má přesnost 100 mV/A a z toho bychom měli vycházet.

$$I = \frac{U_{AN0} - \frac{1024}{2}}{100} [A] \quad \text{rov. 10}$$

Pro zjištění přesnosti měření proudu s 10-bitovým A/D převodníkem, podělíme přesnost měření ACS712, která je 100 mV/A a s přesností A/D převodníku 5/1024. To celé podělíme jedničkou a získáme přesnost 0,0488 A.

$$I_{\text{přesno}} = \left(\frac{0.1}{\frac{5}{1024}} \right)^{-1} = 0.0488 [A] \quad \text{rov. 11}$$

6.3. Nastavení inicializací

Nastavením inicializací programově nastavíme rozsahy a režimy všech používaných periférií procesoru, bez kterých by program nebyl funkční. Prioritním nastavením je nastavení procesorem používaných portů. Zjistili jsme, zdali jde o vstup či výstup a nastavili jsme si je v daném registru TRISx. Pokud pin funguje jako výstup, nastavili jsme ho na logickou 0 a vstup jako logickou 1.

Pro periodické opakování regulace motoru jsme použili časovač T0. Ten je nastavený na nejmenší časový interval 100μs. Tento čas je tak malý, že nebylo zapotřebí používat předdělení hodinového signálu, ale pouze zadat vypočtenou hodnotu do příslušného registru. Použitím předděličky by se přesnost časování zhoršila. Abychom zjistili, v jakém okamžiku je právě daný čas, povolili jsme přerušování a posléze ho voláme.

Dále potřebujeme nastavit A/D převodník a encodér, zajišťující převod měřených veličin do tvaru pro mikroprocesor. U A/D převodníku jsme nastavili dobu vzorkování 100 ns. Dobu jsme zvolili co nejmenší, aby nám nebrzdila regulační proces. Mimo to bylo potřeba nastavit vstupní pin, na něhož je přivedena měřená veličina.

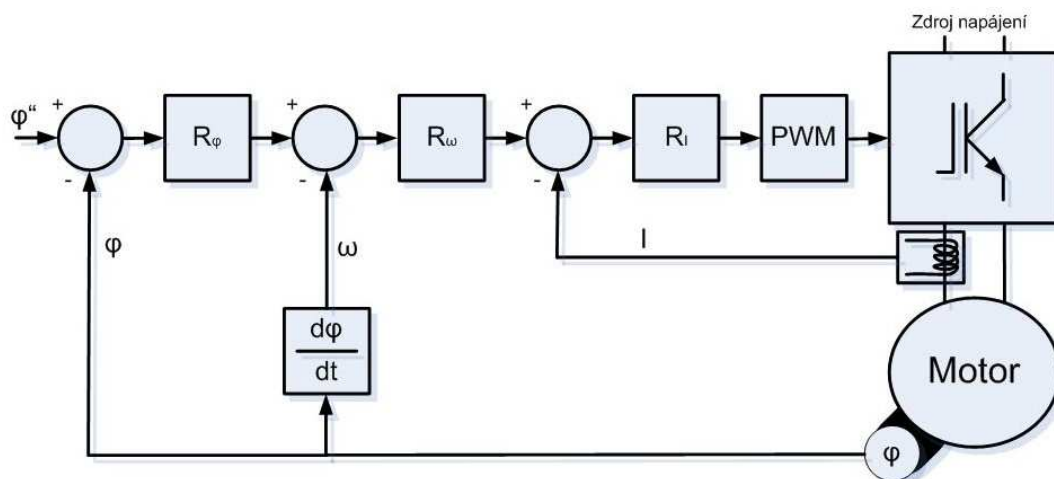
U encoderu nastavíme kvadrurní režim pro přesnější zjišťování polohy a zapneme integrovanou filtraci vstupu, aby nedocházelo k chybám v čítání. Dále nastavíme registr určující maximální počet dílku obsažených v IRC snímači a přerušení, které počítá počet otáček z maximálního počtu dílků a ze směru otáčení.

PWM modul nastavíme na frekvenci 25 kHz a volně běžící režim čítání. Námi nastavená frekvence je pro nás postačující, ale je důležité, aby nebyla v rozsahu slyšitelnosti lidské ucha. Taková frekvence by z motoru vytvořila zdroj nepříjemných zvuků.

Rychlost sériového přenosu jsme si nastavili na 9600 kb za sekundu, bez použití parity, s jedním start a stop bitem. Délka jednoho znaku je 8-bitů.

6.4. Regulace

Na vstupu regulátoru, viz obr. 6.3, máme přivedenou požadovanou hodnotu polohy φ'' převedenou na poměr v procentech. Nastavovaný rozsah $0 - 90^\circ$ odpovídá hodnotě $0 - 100\%$ a takto celou soustavu parametrizujeme. Tato hodnota vstupuje do sumace, v níž je odečtena od aktuální polohy hřídele, též uváděné v %. Ze sumátoru vystupuje výsledná odchylka od požadované polohy, vstupující do akčního členu R_φ . Akční člen R_φ je vhodně naladěný PSD regulátor a jeho výsledná hodnota dále reprezentuje rychlost otáčení. Od této hodnoty odečteme parametrizovanou aktuální rychlost a pomocí regulátoru R_ω převedeme na parametr proudu.



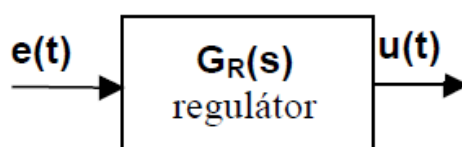
obr. 6.3 Regulační obvod

Regulace proudu je posledním regulujícím členem v soustavě. Má za úkol omezovat velikost proudu, jenž je přímo úměrný momentu motoru, a předcházet poškození motoru. Při

regulaci tedy porovnáváme naměřenou hodnotu s požadovanou a jejich rozdíl nám určí regulační odchylku. Z odchylky určíme podle polarity směr otáčení motoru a následně provedeme absolutní hodnotu. Následuje vstup do PSD regulátoru. Pomocí jeho akčního členu nastavíme střídu PWM modulu. Použité PSD regulátory jsme nastavili metodou Ziegler-Nichols a jejich výstupní akční veličiny jsme limitovali v rozmezí -100 – 100 %.

6.4.1. PID regulátor

Časový průběh regulační odchylky $e(t)$ je vstupem regulátoru a akční veličina $u(t)$ je jeho výstupem. Regulátorem lze regulační odchylku zesilovat, integrovat a derivovat.



obr. 6.4 Blokové schéma regulátoru [11]

Základní typ regulátoru je proporcionální nebo P regulátor. V tomto případě je akční veličina je přímo úměrná regulační odchylce a takový regulátor je prostým zesilovačem. Jedná se o nejjednodušší případ – zesilování.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad \text{rov. 12}$$

O integrační nebo I regulátor se jde v případě, kdy je akční veličina úměrná integrálu regulační odchylky. Jeho vlastnosti eliminují regulační odchylku, naproti tomu však zpomalují děj a zhoršují stabilitu.

$$u(t) = K_i \int e(t) dt \quad \text{rov. 13}$$

Případ regulátoru derivačního nebo D regulátoru, kde by akční veličina byla úměrná derivaci regulační odchylky, nemá technickou realizaci, jelikož by došlo k rozpojení regulačního obvodu v ustáleném stavu. Derivační složka regulátoru zkracuje čas regulace, ale zesiluje šum.

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad \text{rov. 14}$$

Další regulátory vznikají kombinací těchto základních typů. Regulátor proporcionálně-regulační nebo PI regulátor má akční veličinu úměrnou regulační odchylce i integrálu. Vliv regulační odchylky a integrálu je možné zvětšit nebo zmenšit volbou konstant.

Obdobně regulátor proporcionálně-derivační nebo PD regulátor má akční veličinu úměrnou regulační odchylce a její derivaci.

U posledního regulátoru proporcionálně-integračně-derivačního nebo PID regulátoru je akční veličina úměrná regulační odchylce, jejímu integrálu a její derivaci. Vzhledem k předcházejícím typům je PID obecný typ regulátoru a na ostatní lze pohlížet tak, že některá z konstant je rovna nule.[11]

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad \text{rov. 15}$$

6.4.2. PSD regulátor

Tento regulátor je diskretní formou spojitého PID regulátoru. PID regulátor obsahuje proporcionální, integrační a derivační složku, zatímco PSD regulátor má místo integrační složky složku sumační. Převedením rov. 13 na operátorový přenos a zavedením substituce přejdeme do tvaru Z-přenosu.

$$Y(z) = \left[K_p + \frac{K_I T_s}{1 - z^{-1}} + \frac{K_D}{T_s} (1 - z^{-1}) \right] E(z) \quad \text{rov. 16}$$

Jednotlivé složky výstupu regulátoru jsou tvořeny jednotlivými členy závorky na pravé straně rovnice. Jednotlivé složky výstupu se přepisují jako funkce diskretního času.

$$Y_I(z) = K_p E(z) \quad \rightarrow \quad y_I(k) = K_p e(k) \quad \text{rov. 17}$$

Jelikož je v sumační složce navíc zařazeno omezení, tak sumace nevybočuje z rozsahu možného akčního zásahu realizovatelného akčním členem. Sečtený výstup regulátoru je rovněž omezen na stejnou hodnotu.

$$Y_I(z)(1 - z^{-1}) = K_I T_s E(z) \quad \rightarrow \quad y_I(k) = K_I T_s e(k) + y_I(k-1) \quad \text{rov. 18}$$

Při výpočtu derivační složky se nejdříve vypočte difference $e(k) - e(k-1)$ a následně se násobí derivačním zesílením. Pro zesílení menší než 1 je tak zaručena lepší přesnost než při opačném postupu, kdy do rozdílu vstupují čísla zmenšená výše uvedeným násobením.

$$Y_D(z) = \frac{K_D}{T_s} (1 - z^{-1}) E(z) \quad \rightarrow \quad y_D(k) = \frac{K_D}{T_s} [e(k) - e(k-1)] \quad \text{rov. 19}$$

Pro zajištění dobrého rozlišení algoritmu regulátoru se používá základní datový typ minimálně 16-bitů pro parametry i vstupní proměnné. [12]

6.4.3. Nastavení regulátorů metodou Ziegler-Nichols,

Metoda Ziegler–Nicholsova byla původně praktickou a ryze empirickou metodou pro nastavení parametrů regulátorů přímo v provozním zapojení. Nazývá se také metoda seřízení regulátoru podle kritického zesílení. Byla publikována v roce 1942, výsledky byly později potvrzeny i teoreticky. Při použití této metody je nutné dbát na to, že dává menší tlumení přechodového procesu. Tuto metodu je možné aplikovat také početně.

Základní myšlenkou seřizování parametrů regulátoru Ziegler-Nicholsovou metodou v provozním zapojení je přivést obvod na hranici stability, protože optimální nastavení s tímto kritickým nastavením souvisí. Za kritické nastavení (na mezi stability) se považuje takové, při kterém jsou integrační a derivační složky vyřazeny a změnou zesílení je obvod přiveden na hranici stability.

Zesílení, pomocí kterého jsme obvod dostali na hranici stability, se nazývá kritické zesílení. Na hranici stability kmitá obvod netlumenými kmity o konstantní amplitudě. Změříme-li dobu právě těchto kmitů, získáme tzv. kritickou periodu kmitu T_k . Na základě znalostí parametrů kritického zesílení a kritické periody zjistíme z tabulky 6.5 optimální parametry pro kterýkoliv typ regulátoru.

Typ reg.	r_0	T_i	T_d
P	$0,5r_{0k}$	-	-
PI	$0,45r_{rok}$	$0,83 T_k$	-
PD	$0,4 r_{rok}$	-	$0,05 T_k$
PID	$0,6 r_{rok}$	$0,5T_k$	$0,12 T_k$
I *)	-	$2 T_k$	-

obr. 6.5 Seřízení metodou Ziegler-Nicholse [11]

*) U integračního regulátoru se obvod dostane do kritického stavu (na mez stability) změnou integrační konstanty regulátoru T_i , přičemž tuto kritickou hodnotu označíme T_{ik} . Z ní se odvozuje optimální nastavení I regulátoru.

Postup při seřizování regulátoru metodou Ziegler-Nicholse:

- vyřadí se integrační a derivační složka regulátoru ($T_i \rightarrow \infty$, $T_d \rightarrow 0$ respektive $r_i \rightarrow 0$, $r_d \rightarrow 0$)

- pomalu se zvyšuje zesílení r_0 regulátoru, až se dostane na netlumené kmity o konstantní amplitudy a konstantní periodě. Odečte se zesílení (kritické zesílení r_{0k}) a změří se doba kmitu (kritická T_k).
- z kritické doby kmitu T_k a z kritického zesílení r_{0k} na hranici stability se učí podle tabulky 6.5 optimální parametry regulátoru, jenž lze na skutečném regulátoru nastavit.

Metoda Ziegler-Nichols je velmi jednoduchá a v praxi používaná, neboť zaručuje dobrý průběh regulačního pochodu. Nelze ovšem stoprocentně tvrdit že jde o nastavení optimální, jedná se o nastavení blízké optimálnímu. Při další změně parametrů regulátoru by se možná docílilo menší y_{max} a kratší doby regulace T_R .

Tato metoda seřízení selhává u strukturálně stabilních a strukturálně nestabilních obvodů, jelikož tyto obvody nelze převést na mez stability (do kritického stavu). Na víc u strukturálně nestabilních obvodů je seřízení regulátoru nesmyslné. [11]

6.5. Programovací rozhraní

Pro psaní zdrojového kódu jsme použili software distribuovaný výrobcem procesoru MPLab verze 8.0. Abychom mohli mikroprocesor programovat v jazyku C, museli jsme získat studentskou verzi, kterou si po registraci můžeme nainstalovat s platností na 3 měsíce.

Pomocí integrovaného kompilátoru v programu MPLab program přeložíme a tím získáme soubor s příponou *.HEX. Tento soubor poté přes program ASIX UP otevřeme a pošleme přes programátor do mikroprocesoru. ASIX UP je programová podpora k programátorům PRESTO, s nímž lze programovat široké množství procesorů od různých výrobců. Programátor je připojen k počítači přes kabel USB a k mikroprocesoru přes jednotku ICSP.

7. ZÁVĚR

Požadovaným cílem této práce bylo vytvoření řídicího modulu pro stejnosměrný motor. V tom byl zahrnut návrh elektroniky pro řízení a softwarová realizace. To se nám podařilo splnit. Co se týká elektroniky, byla výsledná realizace problému vyřešena čtyřkvadrantovým pulzním měničem a je schopna ovládat motory až do výkonů 500 W. Při realizaci softwaru jsme pro řízení motoru přidali proudovou regulaci, která nám zamezuje přetížení motoru a jeho možné poškození při vzrůstu proudu nad jeho meze.

Pro hardwarovou realizaci řízení jsme si navrhli dva moduly. První modul je složený z mikroprocesoru DSPIC30F2010 a pomocných obvodů potřebných k získání požadované polohy a výsledného řídicího PWM signálu. Dále ještě disponuje sériovou komunikací pro připojení k PC a vlastním zdrojem referenčního napětí pro přesnější měření veličin z A/D převodníku.

Druhý modul je složen z plného čtyřkvadrantního pulzního můstku s jedním vstupem, PWM signálu a obvodu měřící proudové zatížení motoru. Kromě toho ještě obsahuje tři stabilizátory napětí pro napájení řídicích obvodů různého napájení. Výsledkem druhého modulu je univerzální výkonový modul pro řízení výkonného motoru s připojením na různé typy řídicích obvodů, např. PLC automaty.

Pro řízení motoru používáme regulace s třemi zpětnými vazbami. Regulace proudovou smyčkou, která zamezuje přetížení motoru, rychlostní smyčku pro omezení rychlosti otáčení a polohovou k nastavení požadované polohy.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] KEJZLAR, Luděk. *Zpracování signálu z optoelektronického čidla v aplikaci snímače polohy astronomického dalekohledu* [pdf dokument], 11 s. (cit. 2002-06-10). Dostupné na WWW: <<http://www.grecner.cz/astro/irc-01.pdf>>
- [2] SKALICKÝ, J. *Elektrické servopohony – skriptum*. 2. vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2001, 86 s. ISBN 80-214-1978-4
- [3] ŠERÝCH, Jakub. *Začínáme s dsPICem* [online]. (cit. 21.10.2007). Dostupné na WWW: <<http://jakub.serych.cz/zaciname-dspicem>>
- [4] MICROCHIP. *dsPIC30F2010 Data Sheet* [pdf dokument], Microchip Technology Inc. 2008, 204 s. (cit. 2009-10-10). Dostupné na WWW: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70118H.pdf>>
- [5] TEXAS INSTRUMENT. *Dual Full Bridge PWM Motor Driver DRV8402* [pdf dokument], Prosinec 2008, 19 s. (cit. 2008-12-01). Dostupné na WWW: <<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/drv8402.pdf>>
- [6] TEXAS INSTRUMENT. *TXB0104: 4-bit bidirectional voltage-level translator*
With automatic direction sensing and ± 15 -kv esd protection [pdf dokument], únor 2010. (cit. 2010-03-01). Dostupné na WWW: <<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/txb0104.pdf>>
- [7] ALLEGRO. *ACS712: Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor*
with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor [pdf dokument], 14 s. (cit. 2010-03-10). Dostupné na WWW: <http://www.allegromicro.com/en/Products/Part_Numbers/0712/>

- [8] ElektriKa.cz – elektrotechnika každý den [online] . (cit. 2010-04-28). Dostupné na WWW: http://elektriKa.cz/obr/08_elektr_stejn_stroje_02v.jpg
- [9] KOCMAN, Stanislav. *Stejnoseměrné stroje* [pdf dokument], Katedra obecné elektrotechniky, FEI VŠB-TU Ostrava, 2002, 22 s. (cit. 2009-09-20). Dostupné na WWW: <<http://www.isse.pr-net.cz/materialy/ESP/stejnosemerne.pdf>>
- [10] FEL, Západočeská Univerzita v Plzni. *Stejnoseměrné stroje* [online] , 24 s. (cit. 2010 -02-11). Dostupné na WWW: <http://web.fel.zcu.cz/fel/kev/zei/krasl/Podklady_ke_studiu/El_stroje/Rozsirene_el_str_oje/Stejnosemer/>
- [11] ŠVARC, Ivan. *Základy automatizace* [pdf dokument], Brno: CERM s.r.o., říjen 2002, 102 s. (cit. 2010-01-23). Dostupné na WWW: <<http://autnt.fme.vutbr.cz/svarc/ZakladyAutomatizace.pdf>>
- [12] KLÍMA, Bohumil. *Mikroprocesorové řízení elektrických pohonů* [pdf dokument], Elektronický text FEKT VUT v Brně, 2007, 43 s. (cit. 2009-11-24).
- [13] Domovská stránka MAXONMOTOR [online]. (cit. 2009-10-20). Dostupné na WWW: <<http://www.maxonmotor.com>>
- [14] MAXIM. *+5V-Powered, Multichannel RS-232 Drivers/Receivers* [pdf dokument], 36 s., (cit. 2009-09-10). Dostupné na WWW: <<http://www.gme.cz/dokumentace/dokumenty/959/959-278/dsh.959-278.1.pdf>>
- [15] TEXAS INSTRUMENT. *REF5050: Low-Noise, Very Low Drift, Precision VOLTAGE REFERENCE* [pdf dokument], duben 2009, 22 s. (cit. 2009-09-11). Dostupné na WWW: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/ref5050.pdf>

[16] Domovská stránka US Digital [online]. (cit. 2010-05-01). Dostupné na WWW:

<<http://www.usdigital.com> >

SEZNAM OBRÁZKŮ

obr. 2.1 Rotační inkrementální snímač [16]	14
obr. 2.2 Optický snímač [16]	14
obr. 2.3 Stínítko [16]	14
obr. 2.4 a) průběhy IRC snímače, b) zpracování klopným obvodem D pro jednoduchou přesnost, c) zpracování s čtyřnásobnou přesností [1]	15
obr. 2.5 Uspořádání a časová následnost signálů z dekodéru [1]	16
obr. 2.6 Obvod pro převod signálů A a B na signály směr (Q) a Clk pro jednonásobnou přesnost [1]	16
obr. 3.1 Stejnosměrný motor [13].....	18
obr. 3.2 Elementární stroj [8].....	19
obr. 3.3 Průběh napětí na komutátoru [8].....	19
obr. 3.4 Náhradní schéma stejnosměrného motoru [2].....	20
obr. 3.5 Charakteristiky závislosti otáček na momentu a) změna odporu, b) změna napětí, c) změna magnetického toku [9]	22
obr. 3.6 Rozdělení pracovní oblasti motoru [2].....	23
obr. 3.7 Tranzistorový pulzní měnič.....	24
obr. 3.8 Režimy pulzního měniče, vlevo pro motorický režim a), c) a vpravo pro generátorický režim b), d)	25
obr. 3.9 Planetová převodovka [13].....	26
obr. 4.1 Pouzdro a rozmístění vývodů [4]	28
obr. 4.2 Obvod RESET s tlačítkem [3].....	29
obr. 4.3 Zapojení reference REF5050 [15].....	30
obr. 4.4 Horní strana desky.....	31
obr. 4.5 Spodní strana desky.....	31
obr. 4.6 Zapojení konektoru pro spojení výkonové a řídicí desky	32
obr. 5.1 Zapojení paralelního režimu [5].....	35
obr. 5.2 Voltampérová charakteristika ACS712 [7]	37
obr. 5.3 Zapojení hradel pro řízení směru	38

obr. 6.1 Vývojový diagram hlavní smyčky	39
obr. 6.2 Vývojový diagram časové smyčky	40
obr. 6.3 Regulační obvod.....	43
obr. 6.4 Blokové schéma regulátoru [11]	44
obr. 6.5 Seřízení metodou Ziegler-Nicholse [11]	46

SEZNAM TABULEK

tab. 1 Porovnání parametrů tranzistorů.....	24
tab. 2 Parametry motoru [13].....	25
tab. 3 Velikost paměti [4]	27
tab. 4 Příklad poslané zprávy.....	32
tab. 5 Zkratky komunikačního protokolu	33
tab. 6 Možnosti vzniklých chyb [5].....	35
tab. 7 Volba rezistoru [5].....	36

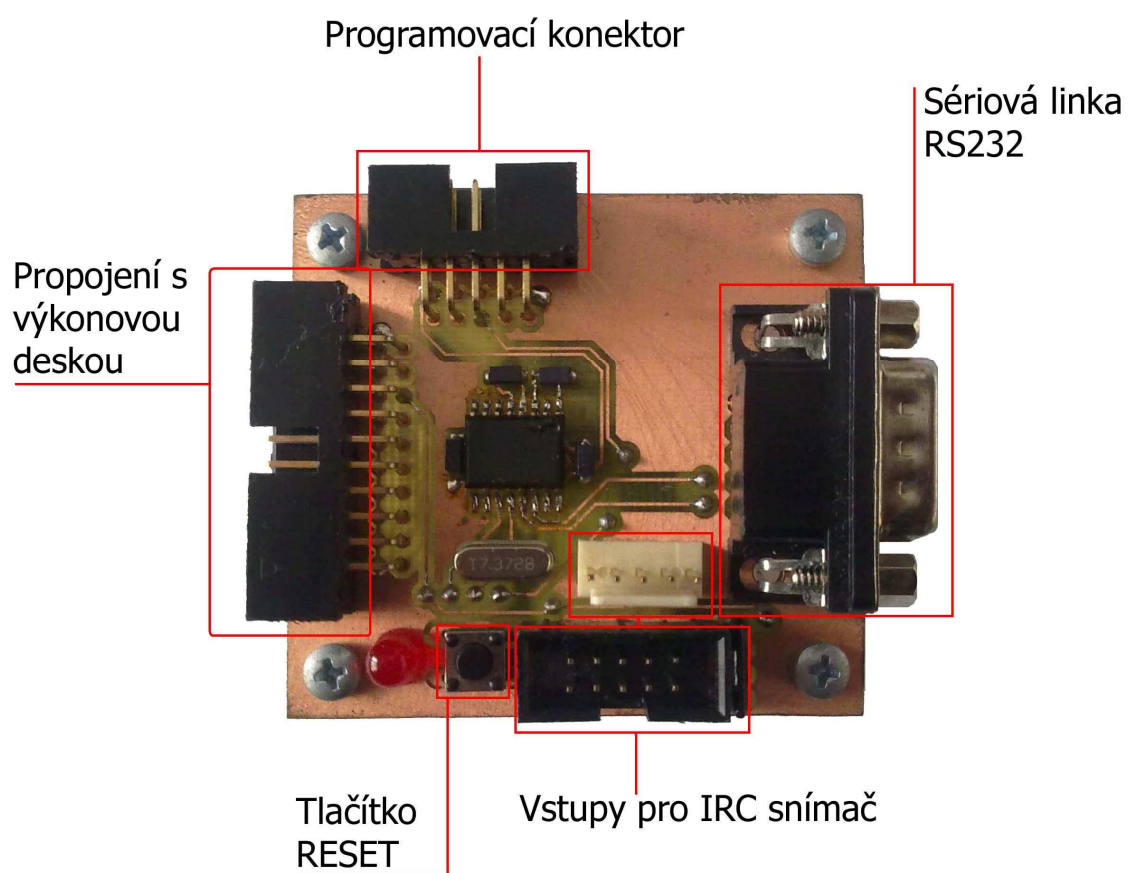
SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA č. 1 – Rozmístění konektoru řídicí desky

PŘÍLOHA č. 2 – Rozmístění konektoru výkonové desky

PŘÍLOHA č. 3 – CD se softwarem pro řídicí jednotku a schémata pro její konstrukci

PŘÍLOHA č. 1 – Rozmístění konektoru řídicí desky



PŘÍLOHA č. 2 – Rozmístění konektoru výkonové desky

